

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛАХ С РАЗРЫВОМ СЕЧЕНИЯ

А.В. Федоров, Т.А. Хмель, Ю.В. Крагова

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

Катастрофические взрывы пыли характеризуются распространением ударных и детонационных волн в ограниченных пространствах сложной геометрии: шахты и иные производственные помещения, транспортеры, вентиляционные каналы, устройства подачи и т.д. Анализ особенностей распространения детонации в ограниченных объемах комбинированной геометрии представляет значительный интерес. Типичными конфигурациями являются обратный уступ, а также канал или труба с внезапным расширением. Настоящая работа посвящена численному моделированию выхода плоской волны гетерогенной детонации из круглой трубы в неограниченное полупространство для взвесей частиц алюминия в кислороде стехиометрического состава. Анализируется влияние геометрического фактора (соотношения диаметров трубы), диаметра частиц на режимы распространения. Результаты расчетов сравниваются с данными для гетерогенной детонации газовзвесей в плоском канале и результатами, полученными для газовой детонации.

Исследования проводятся на основе физико-математической модели детонации частиц алюминия в кислороде [1], верифицированной по экспериментальным данным о зависимости скорости детонации от содержания частиц. Модель основана на представлениях взаимопроникающих континуумов. Основные уравнения, описывающие течения детонации в монодисперсных газовзвесах частиц алюминия для двумерного нестационарного случая представлены в [2]. В работе используется численная технология, опробованная ранее на ряде задач механики гетерогенных сред: схемы TVD для газа и Джендри-Мартина-Дэйли для частиц [3].

Рассматривается цилиндрический канал круглого сечения диаметра $2H_1$, заполненный однородной смесью кислорода и частиц алюминия стехиометрической концентрации. К выходному отверстию канала примыкает плоскость, ограничивающая полупространство. По трубе распространяется плоская детонационная волна в режиме Чепмена-Жуге. Фронт ее в начальный момент времени расположен в точке $x=0.06$ м. Исследуется процесс выхода детонации в полупространство и течение за обратным уступом, а также развитие течения в канале с резким расширением.

Результаты расчетов показали, что картины течения в декартовых и цилиндрических координатах качественно близки, а в критических условиях обнаружены различия. Для иллюстрации на рис. 1 представлены численные шлирен-изображения плотности газа в монодисперсной смеси частиц 2 мкм при ширине выходного канала (диаметра трубы) H_1 , равной 0.02 м. В плоском случае происходит частичное ослабление детонации: центральная часть фронта, примыкающая к плоскости симметрии, сохраняет детонационную структуру и продолжает распространяться, увеличиваясь в радиальном направлении. На части фронта, примыкающей к стенке обратного уступа, происходит разделение фронта на ударную волну и отстающий фронт горения, а затем ре-иницирование в поперечной волне (рис. 1а) с последующим восстановлением детонации (критический режим). В цилиндрическом случае при тех же параметрах смеси имеет место срыв детонации, при этом волновые картины (рис. 1б) соответствуют докритическому режиму).

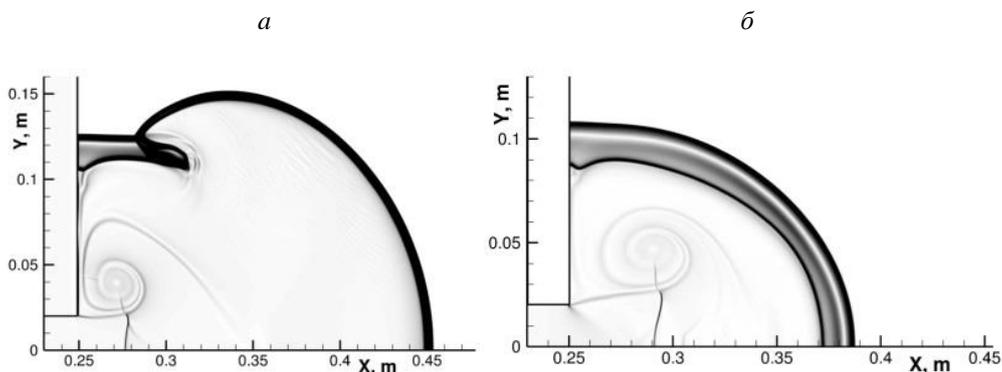


Рис. 1. Различные режимы детонации при $H_1=0.02$ м: критический в плоском канале (а); докритический в цилиндрическом (б); $t=0.26$ мс.

Все полученные в расчетах варианты для цилиндрических и плоских конфигураций были отображены на карте решений в плоскости: диаметр частиц – размер канала и приведены на рис.2 карты решений для плоских [4] (рис. 2а) и цилиндрических (рис. 2б) конфигураций. Сравнение критических значений ширины плоского канала и диаметра круглой трубы для одной и той же взвеси показывает, что отношение указанных геометрических параметров составляет примерно 0.5. Это соотносится с приведенной в [5] и подтвержденной экспериментально формулой, связывающей критический диаметр трубы и критическую ширину плоского канала в газовой детонации $H_{pl} = \sqrt{\pi}H_{cyl}/4 \approx 0.44H_{cyl}$.

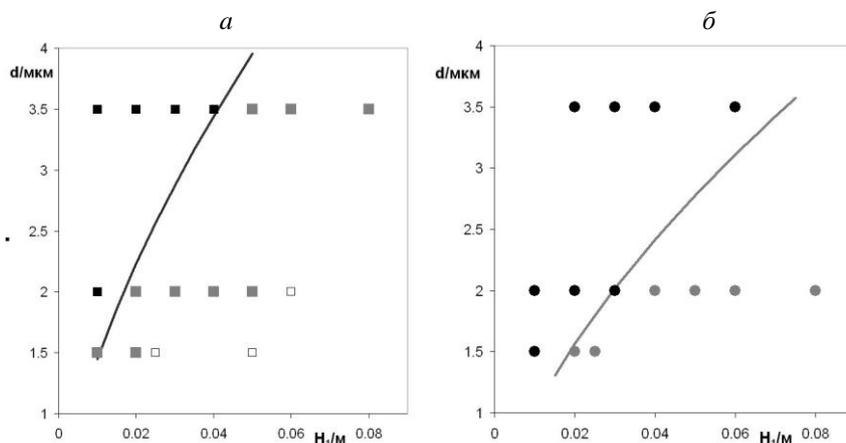


Рис. 2. Карты режимов распространения детонации при дифракции на обратном уступе: плоский канал [4] (а); цилиндрическая труба (б). Светлые значки – закритические режимы, серые – критические, черные – срыв детонации, сплошные линии – аналитические критерии.

Общими свойствами и характеристиками цилиндрических и плоских течений гетерогенной и гомогенной детонации являются: – образование зон несгоревших частиц в критических режимах, – формирование поперечных волн как результат усиления возмущений на фронте в закритических режимах.

Особенностями, присущими только цилиндрической задаче являются: образование загиба фронта в приосевой области в сценариях ре-иницировании в пограничных режи-

мах, связанное с тем, что восстановление детонации начинается на участках, отстоящих как от стенки обратного уступа, так и от оси симметрии (рис. 3), что приводит к искривлению и загибу фронта. Дальнейшее развитие характеризуется образованием «выпячивания» фронта в приосевой области, что также отмечается для некоторых случаев детонационных течений при дифракции в разбавленных газовых смесях [6]. Отметим, что для критических режимов в условиях плоской геометрии таких эффектов выявлено не было.

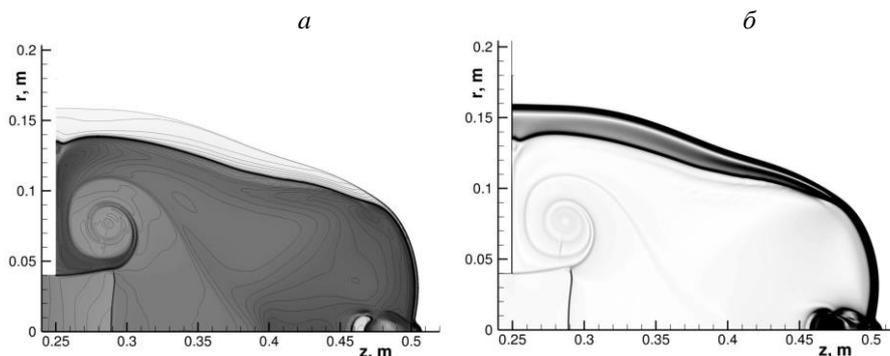


Рис. 3. Пограничный критический режим при выходе из круглой трубы (поле температуры газа (а), численное шпирен-изображение плотности газа (б)). $d=2$ мкм, $H_1=0.04$ м, $t=0.04$ мс.

Для получения критериев распространения гетерогенной детонации в каналах с разрывом сечения в газозвеси стехиометрической концентрации необходимо проводить исследования в плоскости трех параметров: размер узкой трубы, размер широкой трубы и диаметр частиц. Нами были проведены параметрические исследования при варьировании данных параметров.

На режим распространения детонации в целом в канале оказывает влияние в первую очередь режим распространения, реализующейся на начальном этапе в процессе дифракции исходной волны на обратном уступе. При срыве детонации в этом случае отражение волны от стенки широкой части трубы может привести к реиницированию детонации, а, значит, смене режима распространения. Расчеты показали, что влияние широкой части канала на режим распространения детонационной волны ограничивается значением $H_2/H_1 \sim 2-3$, что согласуется с результатами, полученными для газовой детонации [7].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-01723 -а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А.В. Структура гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // Физика горения и взрыва. 1992. Т.28. №3. С.72–83.
2. Федоров А.В., Хмель Т.А. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 4. С. 84–98.
3. Хмель Т.А. Численное моделирование двумерных детонационных течений в газозвеси реагирующих твердых частиц // Мат. моделирование. 2004. Т.16, №6. С.73–77.
4. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Дифракция плоской детонационной волны на обратном уступе в газозвеси // Физика горения и взрыва, 2009, № 5. С. 95– 07.
5. Васильев А.А. Критические условия инициирования цилиндрической многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, №2. С.114–120.
6. Schultz E., Shepherd J. Detonation Diffraction through a Mixture Gradient. Technical Report FM00-1, GALCIT, 2000.
7. Sorin R., Zitoun R., Khasainov B., Desbordes D. Detonation diffraction through different geometries // Shock Waves. 2009. 19. P. 11–23